

J-1

高周速比の回転円柱に作用する流体力と周辺の流速分布に関する実験的研究

An Experimental Study of Fluid Forces acting on a Rotating Cylinder with High Rotation Ratio and Velocity Profile around a Rotating Cylinder

○福永佳晏¹, 居駒知樹², 譚雷², 林昌奎³

*Yoshiharu Fukunaga¹, Tomoki Ikoma², Lei Tan², Chan-Kyu Rheem³

Abstract: In this study, tank experiments were conducted to investigate the flow field around a rotating cylinder and the fluid forces acting on it in a range of high rotation ratios, assuming offshore drilling. For rotation ratios above 15, the drag coefficient increased to around 14, and the tangential velocity distribution approximated the velocity distribution for rotation only. For rotation velocity ratios greater than 15, the range of wake flow is considered to be expanded by the velocity distribution of the rotating cylinder.

1. 緒言

海底掘削では、レーザーレス掘削が行われる。レーザー掘削に比べて、ドリルパイプは海中に晒された状態になる。実海域での大変形時には、摩擦熱を生じながら破断を起こすことが報告されている^[1]。ドリルパイプの挙動予測が必要だが、回転によるマグナス効果や自励振動など複数の現象により挙動は複雑となることが考えられ、事前の予測は困難である。

これまでにドリルパイプのような回転円柱に作用する流体力に関する研究が行われてきた。Chen ら^[2]や Suzuki ら^[3]は一様流の流速と回転円柱の周速である周速比が 10 までの範囲で、流体力係数が周速比に対して非線形に増大することを明らかにした。しかし、理想的な掘削条件では低流速・高回転数になる場合があり、実際の掘削時には局所で周速比が 10 を超える可能性がある。周速比が 10 を超える場合に流体力が増大し続けるかは不明である。

本研究では、高周速比の回転円柱に作用する流体力と周辺の流速分布との定量的な関係を調査することを目的とし、高周速比の回転円柱に関する知見は少ないため、水槽実験による調査を行った。

2. 水槽実験

本実験は、東京大学生産技術研究所千葉実験所、海洋工学水槽にて行った。Figure 1 に水槽実験の諸元を示す。海洋工学水槽は長さ 50 m, 幅 10 m, 水深 5 m である。使用した円柱模型は直径 D が 300 mm, 長さが 820 mm である。喫水 d が 800 mm の円柱模型をモーターで強制回転させ、移動床とともに曳航台車で曳航した。曳航台車の移動速度を代表流速 U とし、0.05 m/s から 0.40 m/s で変化させた。レイノルズ数は $1.32 \times 10^5 \sim 1.05 \times 10^6$ の範囲である。円柱模型の回転周波数 f は無回転の 0 Hz から 3.33 Hz で変化させた。に水槽実験装置を

示す。曳航時の流速は電磁流速計で計測し、移動式サーボで流速の計測位置を変化させた。本研究での座標系を Figure 2 に示す。 F_D は抗力, F_L は揚力, v_t は接線方向の流速, v_r は半径方向の流速, r は円柱の中心からの距離である。本研究では、流体力および流速が定常状態となる、曳航台車が一定の速度で動く範囲で計測した値を時間平均した値を用いる。

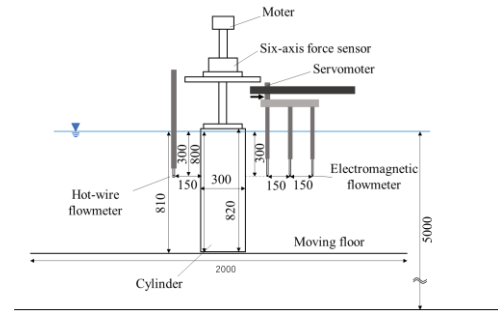


Figure 1. Sideview of Experimental Setup System

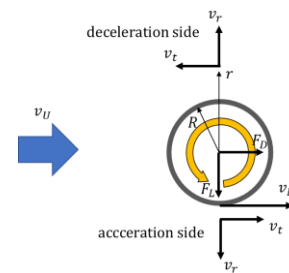


Figure 2. Coordinate System

曳航時の周速比 α は (2.1) 式である。流速の計測位置は円柱模型の半径 R を用いて (2.2) 式のように無次元化する。抗力 F_D と揚力 F_L は (2.3) 式, (2.4) 式のように無次元化する。 ρ は流体の密度, v_R は円柱の周速である。

$$\alpha = \frac{\pi f D}{v_U} = \frac{v_R}{v_U} \tag{2.1}$$

$$R' = \frac{r - R}{R} \tag{2.2}$$

1: 日大理工・院 (前) 2: 日大理工・教員・海建 3: 東京大学生産技術研究所

$$C_D = \frac{2F_D}{\rho D d v_0^2} \quad (2.3)$$

$$C_L = \frac{2F_L}{\rho D d v_0^2} \quad (2.4)$$

3. 結果および考察

Figure 3 に回転円柱の減速側と加速側の流速分布を示す。周速比が30以上では、回転円柱近傍で回転のみの条件に流場特性が類似した。高周速比では回転の影響が支配的な領域と一様流が支配的な領域に分けられると仮定すれば、減速側の運動量 F_{Ld} と加速側の運動量 F_{La} の差より(3.1)式で揚力 F_L が推定できる。減速側と加速側の非対称な接線方向の流速分布による運動量の差が、回転円柱に作用する揚力になる。回転円柱近傍では静水中の回転円柱周辺の流速分布、回転円柱から離れた位置では一様流の流速分布となる仮定から、周速比に対する揚力を推定した。 r_a は加速側の回転円柱の影響範囲、 r_d は減速側の回転円柱の影響範囲である。

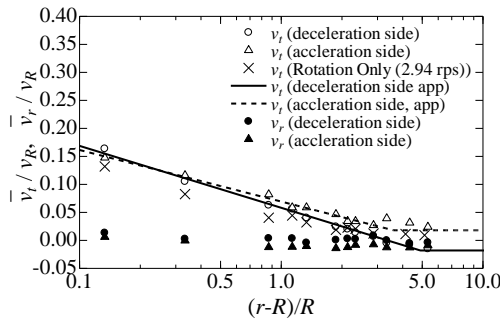


Figure 3. Velocity Profile ($\alpha = 55$)

$$\overline{F_L} = \overline{F_{La}} - \overline{F_{Ld}} = \rho \iint_{S_a} \overline{v_t}(r)^2 dS - \rho \iint_{S_d} \overline{v_t}(r)^2 dS \quad (3.1)$$

$$\overline{F_L} = \rho d \int_{r_a}^{r_d} v_R^2 \left\{ \left(\frac{\overline{v_t}}{v_R} \right)^2 - \frac{1}{\alpha^2} \right\} dr \quad (3.2)$$

周速比に対する流体力係数を Figure 4, 揚抗比を Figure 5 に示す。周速比が30を超えると、揚力係数が僅かに減少し、抗力係数の増大が鈍くなる傾向が現れた。揚力係数や揚抗比の傾向から、さらに高い周速比では、抗力係数が流れのみの無回転($\alpha=0$)の条件より10倍ほど大きく、揚力係数が小さくなると考えられる。

(3.2)式のように流速分布の運動量から計算した揚力係数は、高周速比側において六分力計で直接計測した揚力係数と近い値を示しており、In-line 方向の流速分布から揚力係数を推定できると考えられる。高周速比での揚力係数では、Chen ら^[2]が行った数値計算とは異なる結果となった。これは回転円柱周辺への影響範囲

が、実験結果に比べて数値計算での回転円柱の影響範囲が広いことによる影響と考えられる。高周速比の回転円柱に関する数値計算では、運動量伝搬による流場への影響範囲を再現する必要があると考えられる。

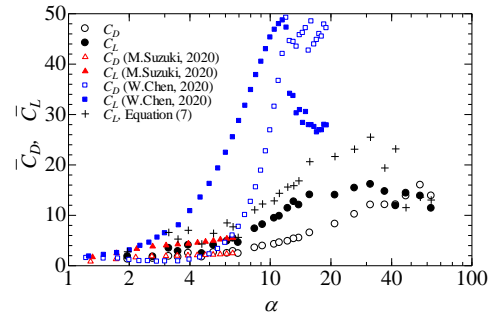


Figure 4. Drag and Lift Coefficients

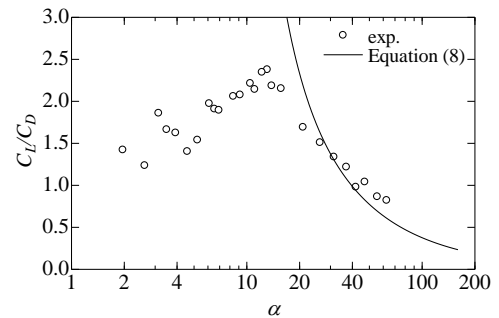


Figure 5. Lift-Drage Ratio

4. 結言

本研究では、高周速比の回転円柱周辺の流場と作用する流体力を明らかにするために水槽実験を行った。

周速比が15までの流体力係数は増大し、周速比が15以上で揚力係数は減少したため、揚抗比が対数的に減少した。高周速比域では半径の4倍程度までの流場で、回転のみの流速分布となった。揚抗比が対数的に減少する周速比域では、増速側と減速側の運動量の差が小さくなるため、揚力係数が減少したと考えられる。

5. 参考文献

- [1] 井上朝哉, 和田一育, 大沢直樹, 藤久保昌彦, 鈴木博善, *Ciro Santus: ドリルパイプ破断事例の破壊メカニズムに関する技術的考察*, 日本船舶海洋工学会論文集, 第26巻, pp183-193, 2017
- [2] Wei Chen, Chang-kyu Rheem : Experimental investigation of rotating cylinders in flow, *Journal of Marine Science and Technology*, pp.111-122, 2018
- [3] Masahiro Suzuki, Tomoki Ikoma, Yasuhiro Aida and Chang-Kyu Rheem : EXPERIMENTAL STUDY ON THE END EFFECT AND THE EFFECT DUE TO THE DIFFERENCE IN END SHAPE OF THE FLUID FORCE ACTING ON A ROTATING CYLINDER IN A UNIFORM FLOW, *OMAE2021*, OMAE2021-62589, 2021